
Оценка влияния комплексной добавки на водопоглощение фиброгипса

П.Э. Соколов, К.О. Молчанов, С.М. Крахоткин, С.В. Лукиных
Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: Исследовано водопоглощение фиброгипса модифицированного комплексной добавкой. Целью исследования являлось определение влияния и дозировок, составляющих комплексной добавки на водопоглощение фиброгипса. Для выполнения работы использовался строительный гипс и комплексная модифицирующая добавка, состоящая из следующих компонентов: полипропиленовая фибра, тонкодисперсный инертный наполнитель, суперпластификатор и редеспергируемый полимерный порошок. Для проведения исследований было проведено планирование эксперимента и применен центральный композиционный план. Полученные результаты исследований позволили рассчитать и проанализировать описательные статистики. Выявлено положительное влияние исследованных факторов на снижение водопоглощения. Установлено, что расход тонкодисперсного инертного наполнителя и суперпластификатора способствуют уменьшению водопоглощения фиброгипса. Анализ и обработка данных проведенных исследований позволили получить математическую модель влияния расходов компонентов комплексной добавки на водопоглощение фиброгипса и выявить состав фиброгипса имеющий наименьшее водопоглощение. Полученная модель позволила спрогнозировать состав с наименьшим водопоглощением.

Ключевые слова: фиброгипс, водопоглощение, комплексная добавка, модифицированный, центральный композиционный план, модель, эффективность добавки.

Одним из важнейших физических свойств строительных материалов является водопоглощение. Величина этого показателя позволяет судить об иных физико-механических и технических свойствах материала, в частности, о плотности, морозостойкости, деформационных характеристиках, долговечности и т.п. Известно, что водопоглощение материала зависит от его пористости и, соответственно, плотности [1, 2].

В работах российских и зарубежных авторов [3, 4] значительное внимание уделяется использованию различных по предназначению и действию химических добавок [5-7], а также различных наполнителей [8, 9], с целью улучшения как технологических свойств смесей на основе гипсового вяжущего, так и физико-механических свойств уже готовых материалов и изделий на основе гипса [10-11]. Использование тонкодисперсных наполнителей и химических добавок способствует уменьшению пористости

и как следствие снижению водопоглощения, а также повышению плотности и прочности материала [12, 13]. Поэтому возникает потребность выяснить, как это утверждение воздействует и влияет на материалы на основе гипса, в частности фиброгипс модифицированный комплексной органо-минеральной добавкой.

На ряду с этим все чаще для решения задач направленных на улучшение каких-либо свойств строительных материалов, в том числе гипса и фиброгипса находят все более широкое использование методы планирования эксперимента [14, 15]. Их применение позволяет достичь решения поставленной задачи с требуемой точностью, используя оптимальное число и условия проведения опытов.

Целью настоящей работы является исследование по определению, анализу и оценке влияния комплексной модифицирующей добавки на водопоглощение фиброгипса и выявление возможности снижения водопоглощения фиброгипса модифицированного комплексной добавкой.

Для достижение данной цели были поставлены и решены следующие задачи: изучены характеристики фиброгипса с комплексной добавкой; определено водопоглощение фиброгипса с комплексной добавкой, согласно принятого плана эксперимента и определено влияние количества составляющих комплексной добавки на водопотребность фиброгипса.

Для проведения исследований в качестве вяжущего вещества применялся строительных гипс марки Г-4 Б-П. На момент проведения исследований вяжущее характеризовалось следующими показателями: нормальная плотность гипсового теста – 0,75; предел прочности при сжатии – 4,36 МПа; предел прочности при изгибе – 2,15 МПа.

Комплексная модифицирующая добавка содержала в своем составе: суперпластификатор Aktiflux 020; редеспергируемый полимерный порошок RPP 100; пеногаситель SiOtan 40, а также минеральные составляющие –

полипропиленовая фибра и тонкодисперсный инертный наполнитель на основе кремнезема.

Суперпластификатор Aktiflux 020 обладает пластифицирующим и стабилизирующим действием. Редеспергируемый полимерный порошок помимо основных свойств обладает способностью по снижению водопоглощения. Порошкообразный пеногаситель SiOtan 40 применялся с целью удаления излишнего воздуха из фиброгипсового теста и придания гипсу более плотной структуры, а также способствует получению гладкой поверхности изделия. В отличие от остальных компонентов комплексной модифицирующей добавки он вводился во все составы в одинаковом количестве – 1%, т.е. не являлся фактором при планировании эксперимента.

В качестве микроармирующего компонента фиброгипса использовалось резаное полипропиленовое волокно, имеющее длину от 6 до 40 мм. Введение фибры как правило способствует повышению прочности на изгиб, снижению образования трещин и уменьшению усадки.

Определение водопоглощения производилось в соответствии с ГОСТ 23789-2018. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. Для этого образцы высушивались до постоянной массы. Далее образцы взвешивались с точностью 0,01 г и помещались в горизонтальном положении в ванну, после чего заливались водой до половины. Через $2 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$ образцы заливают водой полностью и выдерживают еще $2 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$. Затем образцы извлекаются из воды, обтираются влажной тряпкой и взвешиваются. Для оценки динамики водопоглощения образцы взвешивались со следующими интервалами: $30 \pm 2 \text{ мин}$; $60 \pm 2 \text{ мин}$; $2 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$; $4 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$; $24 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$ и $72 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$.

С целью уменьшения объема проводимых исследований и его оптимизации было проведено математическое планирование эксперимента. Для этого был выбран центральный композиционный план. При наличии

четырёх факторов план содержит 31 точку испытаний, включающих в себя 16 точек куба, 7 центральных точек и 8 осевых точек. В таблице № 1 приведены условия планирования эксперимента.

Таблица № 1

Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровни фактора, %			Интервал варьирования
натуральный	кодированный	-1	0	+1	
фибра	X1	0,30	0,15	0,60	0,15
тонкодисперсный наполнитель	X2	15,0	32,5	50,0	17,5
суперпластификатор	X3	0,50	2,75	5,00	2,25
редеспергируемый полимерный порошок	X4	0,50	1,25	2,00	0,75

Результаты проведенных исследований по определению водопоглощения фиброгипса модифицированного комплексной добавкой приведены в таблице № 2. В таблице №2 приведен фрагмент плана эксперимента для кодированных факторов и следующих откликов: Y3 – средняя плотность фиброгипсового материала, кг/м³; Y4 – водопоглощение фиброгипсового материала в возрасте 4 ч ± 2 мин.

Таблица № 2

Результаты исследований (фрагмент)

№ п/п	Факторы				Отклики	
	X1	X2	X3	X4	Y3	Y4
1	2	3	4	5	6	7
1.	-1	-1	-1	-1	1,008	41,3
2.	+1	-1	-1	-1	0,972	37,9
3.	-1	+1	-1	-1	0,944	40,5
4.	+1	+1	-1	-1	0,973	47,0
5.	-1	-1	+1	-1	1,190	32,1

Результаты исследования контрольного бездобавочного состава, следующие: средняя плотность – 1,055 кг/м³; водопоглощение – 39,6 %.

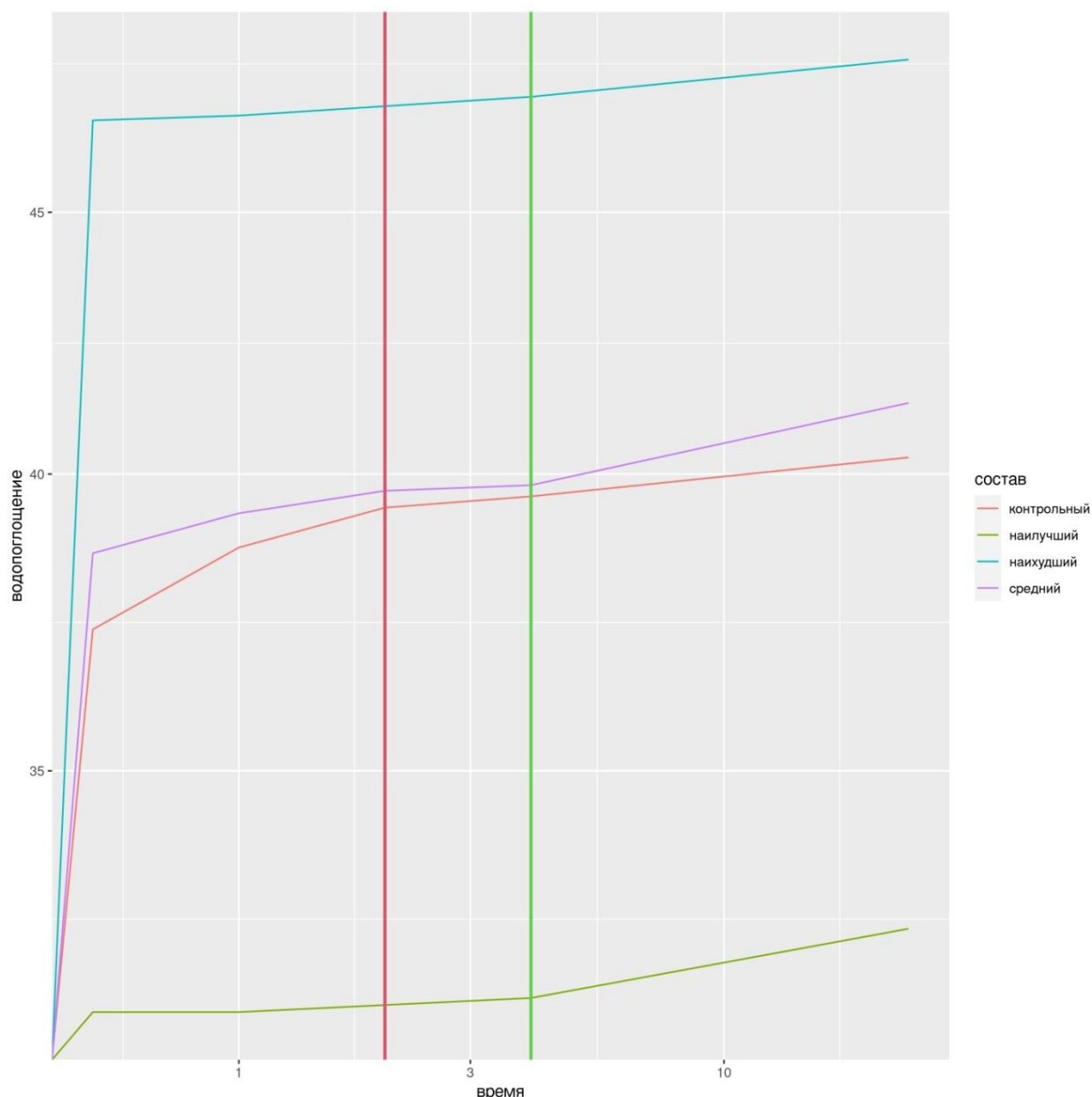


Рис. 1. – Динамика водопоглощения фиброгипсового материала (шкалы по обоим осям выполнены логарифмическими)

На рис. 1 приведены графики, показывающие динамику водопоглощения фиброгипса четырех составов: наилучшего – состав №14; наихудшего – состав №4; контрольного – состава без добавок и наполнителей и среднего для всех 31 составов. Красная вертикальная линия указывает временной промежуток равный $2 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$, а зеленая $4 \text{ ч} \pm 2 \text{ мин}$.

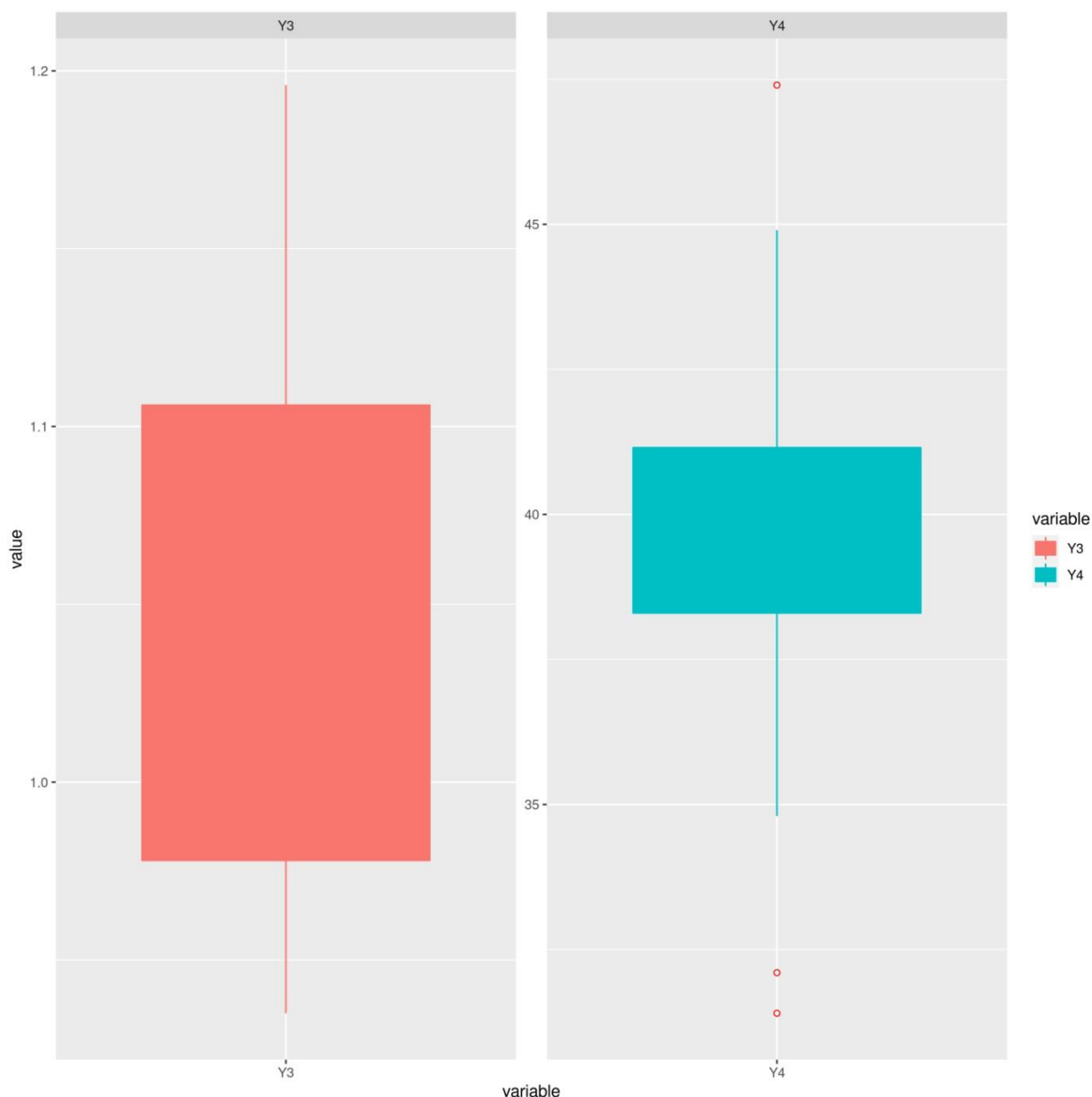


Рис. 2. – Диаграммы размахов средней плотности и водопоглощения фиброгипса

Проведем предварительный анализ полученных данных. Представим числовые данные описательных характеристик в виде диаграммы размахов на рис. 2. Как видно из диаграммы у функции отклика – средняя плотность (Y3) имеет место сдвиг распределения в положительную сторону. У функции отклика – водопоглощение (Y4) сдвига распределения не наблюдается. Для функции отклика – водопоглощение минимальное значение составляет – 31,4%, нижний квартиль – 38,3%, медиана – 40,8%, среднее – 39,77%,

верхний квартиль – 41,15%, а наибольшее – 47,4%. При этом только для водопоглощения имеют место выбросы, которые отмечены красными кружками – наибольший – 47,4% и наименьшие – 31,4% и 32,1% соответственно.

Степень линейной связи между двумя переменными можно отобразить с помощью диаграммы рассеяния, для данных результатов исследований.

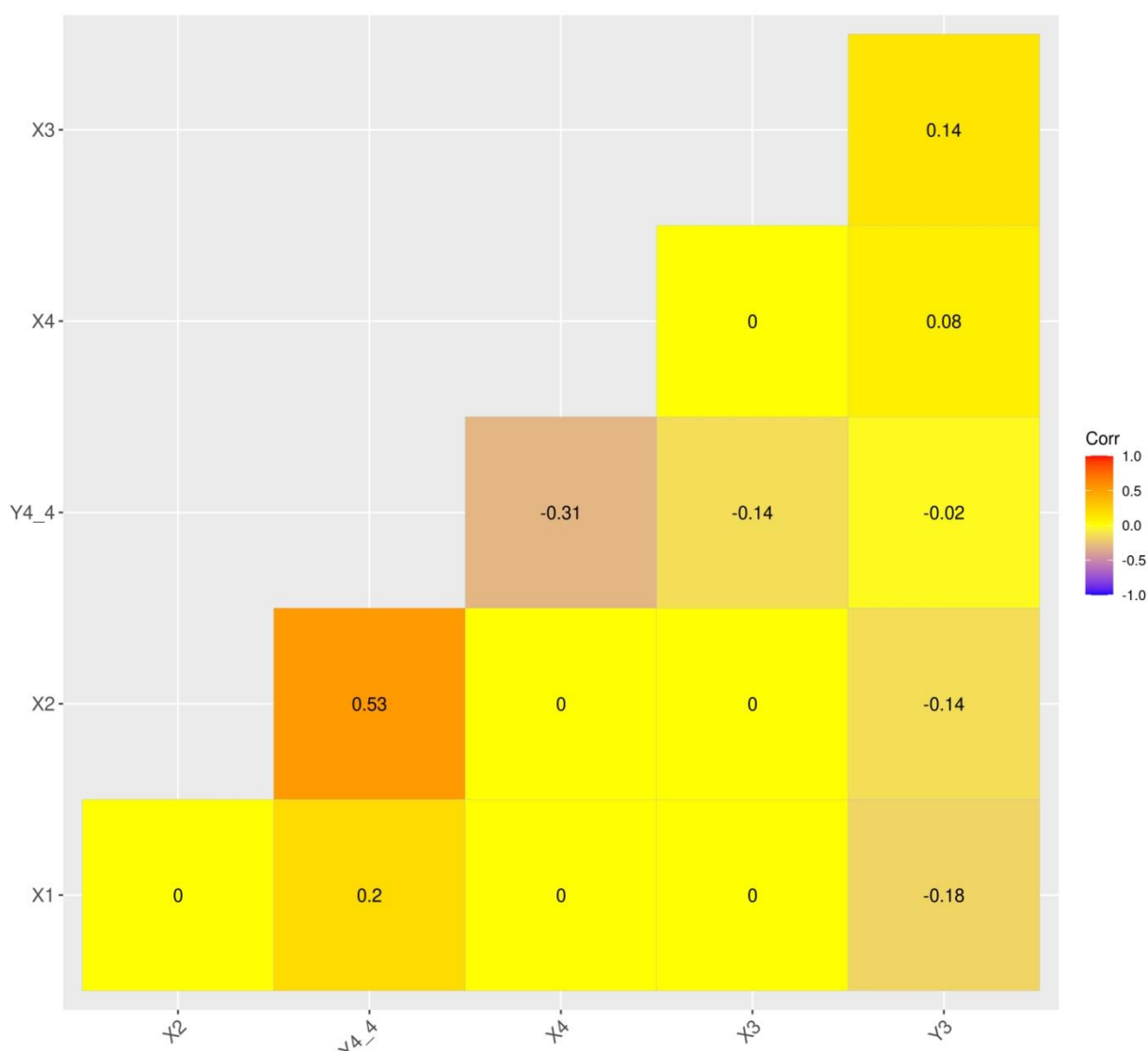


Рис. 3. – Матрица диаграмм рассеяния значений зависимых и независимых переменных для данных результатов исследований

Как следует из рис. 3, средняя положительная корреляция имеет место между водопоглощением и расходом тонкодисперсного наполнителя. Слабая отрицательная корреляция отмечена между водопоглощением и редиспергируемым полимерным порошком. Очень слабая положительная корреляция имеет место между водопоглощением и расходом полимерной фибры. Очень слабая отрицательная корреляция имеется между водопоглощением и расходом суперпластификатора, а также между водопоглощением и средней плотностью фиброгипса. Очень слабая положительная корреляция отмечена между средней плотностью фиброгипса и расходами суперпластификатора и редиспергируемого полимерного порошка. Очень слабая отрицательная корреляция имеется между средней плотностью фиброгипса и расходами полимерной фибры и тонкодисперсного наполнителя.

На рис. 4 представлены диаграммы ядерной функции плотности для водопоглощения, полученные для каждого интервала исследования, а также для средней плотности модифицированного фиброгипса.

В нижней части каждой из диаграмм размещен график-щетка, показывающий реальные значения функции отклика, наложенные на прямую. Помимо этого, на каждую диаграмму нанесена вертикальная линия, соответствующая значению водопоглощения для контрольного состава, а на последней диаграмме – средней плотности контрольного состава. Как видно на рис. 4 с течением времени значение водопоглощения контрольного образца остаются без значительных изменений. Однако, как следует из диаграмм ядерной функции плотности, для всех временных интервалов имеет место группа из 8-10 составов, обладающих более низкими показателями водопоглощения по сравнению с контрольным составом.

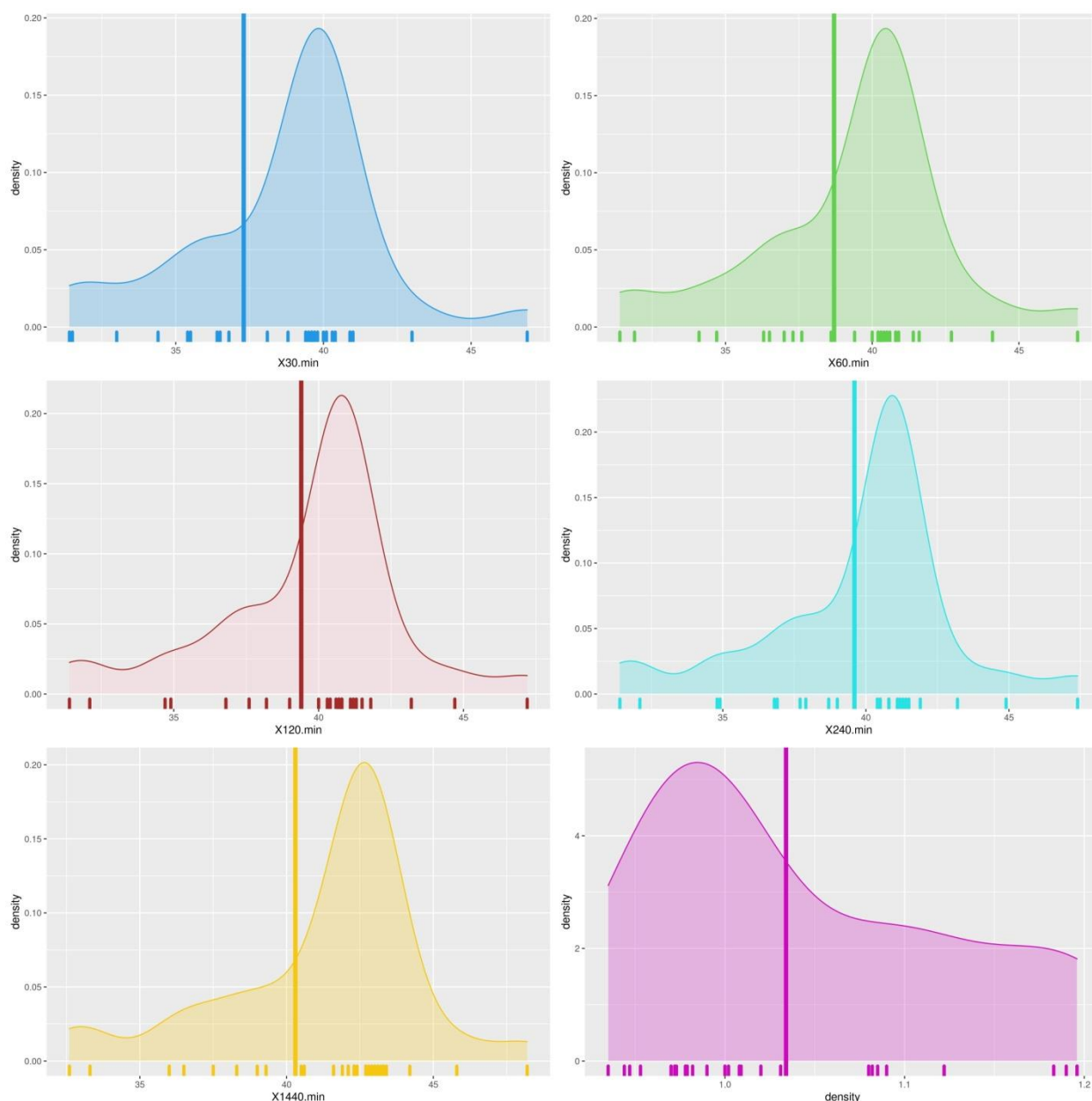


Рис. 4. – Диаграммы ядерной функции плотности

В результате перебора различных вариантов была получена модель, которая наиболее полно отражает влияние входных переменных и их взаимодействий на водопоглощение фиброгипса модифицированного комплексной добавкой. В таблице №3 приведены результаты анализа плана эксперимента для функции отклика – водопоглощение модифицированного фиброгипса. Используя значения вероятностей, приведенные в таблице №3, определим значимость влияний на водопоглощение модифицированного фиброгипса. При $\alpha = 0,05$ основные влияния – расход тонкодисперсного

наполнителя (X2) и расход редиспергируемого полимерного порошка (X4) являются статистически значимыми, т.к. соответствующие им значения вероятности меньше 0,05. Остальные факторы, квадрат факторов и двойные взаимодействия факторов статистически незначимы, поскольку их значения превышают $\alpha = 0,05$.

Таблица № 3

Оцениваемые влияния и взаимодействия (для кодированных единиц)

Факторы и взаимодействия	Эффект	Коэффициент	T – критерий Стьюдента	P – значение
1	2	3	4	5
константа	40,195	0,576	69,82	0,000
X1	0,750	0,512	1,46	0,157
X2	1,950	0,512	3,81	0,001
X3	-0,500	0,512	-0,98	0,340
X4	-1,150	0,512	-2,25	0,035
X1X1	-0,543	0,463	-1,17	0,253
X1X4	-0,888	0,627	-1,41	0,171
X2X3	0,925	0,627	1,47	0,154
X3X4	0,875	0,627	1,39	0,177

Оценку значимости факторов проведем с помощью гистограммы Парето, которая отображает влияние факторов и их взаимодействий в абсолютных значениях. На рис. 5 табличное значение критерия Стьюдента указано красной пунктирной линией. Факторы, квадраты факторов и взаимодействия факторов, для которых рассчитанные значения критерия Стьюдента превышают табличные (т.е. пересекают линию) являются статистически значимыми.

Таким образом, функция отклика водопоглощение фиброгипса, для реальных значений будет иметь вид:

$$Y_4 = 11,7 + 136,4X_1 - 0,036X_2 - 6,09X_3 + 5,4X_4 - 96,6X_1X_1 - 31,6X_1X_4 + 0,094X_2X_3 + 2,07X_3X_4 + \varepsilon, \quad (1)$$

где ε - отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых равна $-2,50922$.

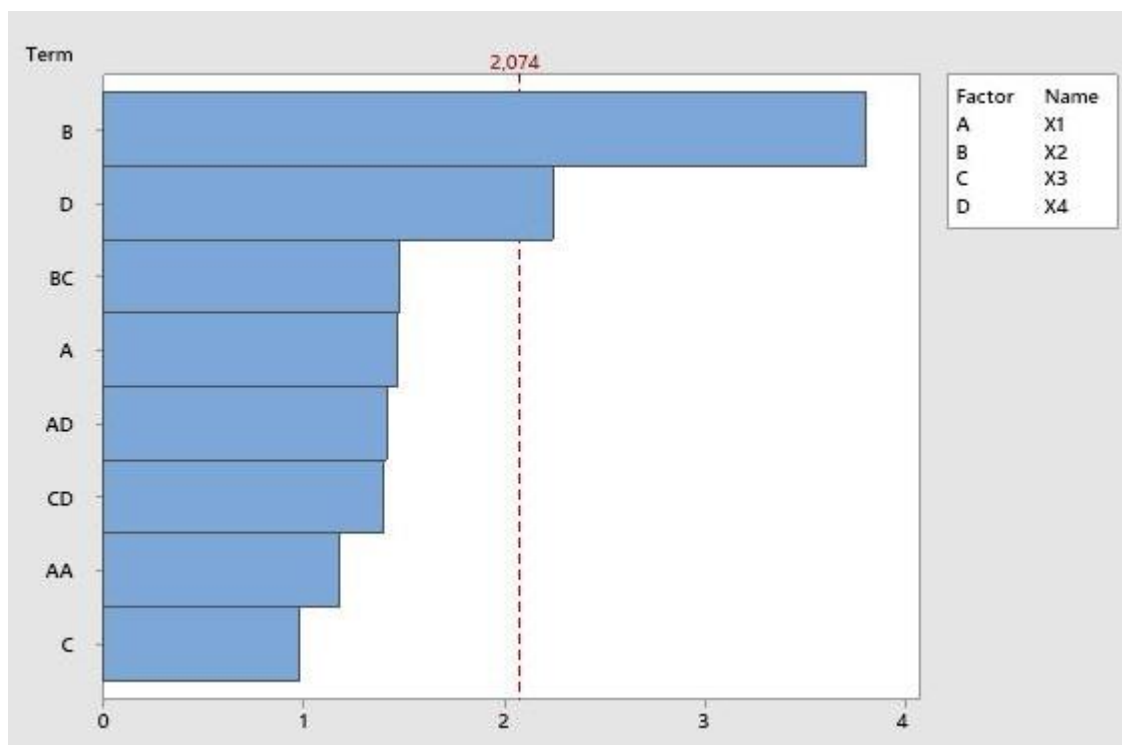
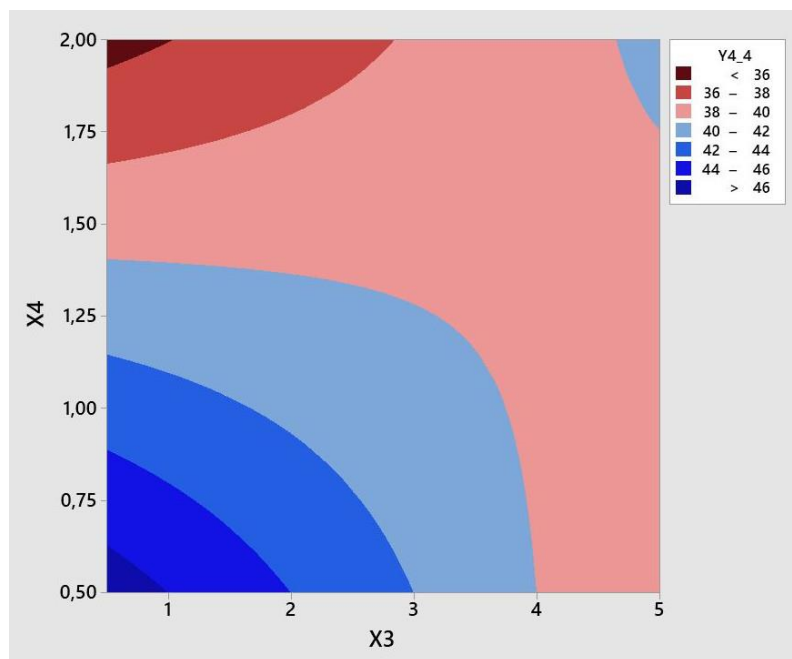


Рис. 5. – Оценка влияний факторов по закону Парето для водопоглощения фиброгипса

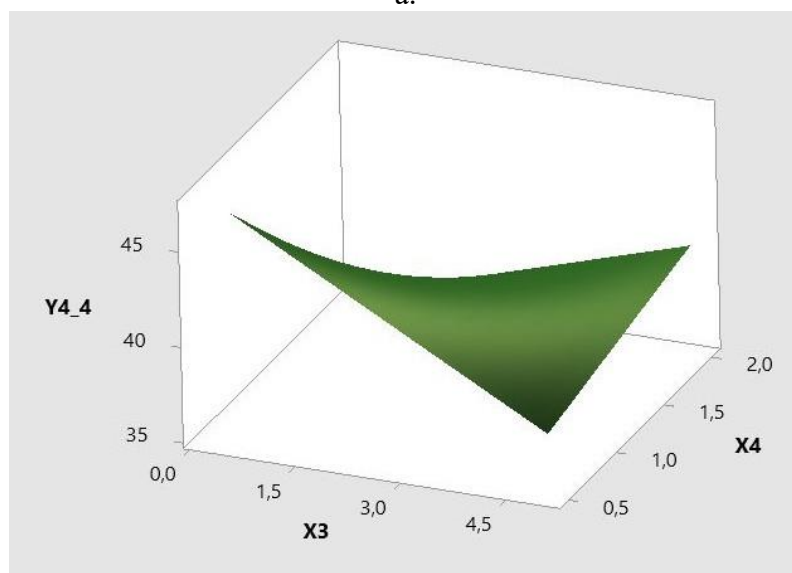
Предварительную оценку адекватности модели можно сделать на основании коэффициента детерминации R^2 , который для водопоглощения фиброгипса составляет 57,8%. Т.е. изменение этого показателя на 57,8% зависит от исследуемых факторов, а на долю остальных факторов приходится 42,2%. Следовательно, характер связи можно оценить, как средний.

Из формулы (1) следует, что на величину водопоглощения фиброгипса оказывают влияние все исследованные факторы, квадрат фактора X_1 и двойные взаимодействия факторов X_1X_4 , X_2X_3 и X_3X_4 . Учитывая величины и знак влияния факторов и их взаимодействий отметим, что увеличению водопоглощения фиброгипса способствует расход фибры, расход редispersируемого полимерного порошка, а также двойные взаимодействия расхода микрокремнезема на расход суперпластификатора и расход суперпластификатора на расход редispersируемого полимерного порошка. Однако влияние последних относительно невелико. Уменьшению величины

водопоглощения способствует расходу тонкодисперсной инертной добавки, суперпластификатора, однако величина этого влияния невысока, а также квадрата расхода полипропиленовой фибры и двойного взаимодействия расходов фибры и редиспергируемого полимерного порошка.



а.



б.

Рис. 6. – Графики зависимости функции отклика Y_4 от факторов X_3 и X_4 : а – контурный график; б – график поверхности

Построим контурные графики и графики поверхности для функции отклика. Из всех возможных вариантов в качестве примера приведем

зависимость функции отклика от факторов X3 (расход суперпластификатора) и X4 (расход редispersируемого полимерного порошка).

Как следует из графиков, приведенных на рис. 6, наименьшее водопоглощение фиброгипса можно получить при наименьшем расходе суперпластификатора – 0,5% и максимальном расходе редispersируемого полимерного порошка – 2% (на контурном графике – область бордового цвета). При этом, расход фибры и тонкодисперсного инертного порошка должны составлять 0,45% и 32,5% соответственно.

Произведем оценку эффективности комплексной модифицирующей добавки для уменьшения водопоглощения фиброгипса по формуле:

$$P_W = \frac{W_{\text{контр}}}{W_{\text{осн}}} = \frac{39,6}{31,4} = 1,26, \quad (2)$$

где $W_{\text{контр}}$ – водопоглощение образцов контрольного состава, % по массе; $W_{\text{осн}}$ – водопоглощение образцов основного состава, % по массе.

Таким образом, на основании анализа и обработки результатов эксперимента можно сделать следующие выводы и заключения. Предложена комплексная модифицирующая добавка для фиброгипса способствующая уменьшению его водопоглощения. Использование комплексной добавки для фиброгипса позволяет уменьшить его водопоглощение на 20,7% по сравнению с контрольным составом, что соответствует эффективности комплексной добавки – 1,26. В результате анализа экспериментальных данных получена математическая модель, обладающая прогнозирующей способностью и позволяющая получить численные значения расходов компонентов комплексной добавки соответствующие наименьшему водопоглощению фиброгипса. Минимальное водопоглощение, которое возможно получить, используя полученную математическую модель составляет 23,17%. При этом расход материалов будет следующим: фибра – 0,3%, тонкодисперсный инертный наполнитель – 15%, суперпластификатор –

5% и редеспергируемый полимерный порошок – 0,5%. В этом случае эффективность комплексной модифицирующей добавки для уменьшения водопоглощения фиброгипса составит – 1,71, что позволит уменьшить водопоглощение на 35,7% по сравнению с наилучшим составом, полученным в результате планирования эксперимента.

Литература

1. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): Справочник. М.: АСВ, 2004. 488 с.

2. Кузьмина Р.И., Ержанова Н.С., Кунашева З.Х. Физико-химические основы формирования структуры гипсовых вяжущих материалов // Всероссийская конференция «Химия биологически активных веществ». Саратов. Саратовский источник, 2019. С. 138-140.

3. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.B. Water-Resistant Gypsum Binding Agents and Concretes Based Thereof as Promising Materials for Building Green. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 177. №1. pp. 012-029. DOI: 10.1088/1755-1315/177/012029.

4. Морковин А.А., Горохов Т.И., Ковалев Н.С., Ерофеев А.В. Определение водопоглощения и набухания woodгипса // Всероссийская научно-практическая конференция «Строительство и реконструкция». Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 255-258.

5. Рузина Н.С., Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Первушин Г.Н., Семенова Ю.А., Бегунова Е.В. Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками // Строительные материалы. 2020. №7. С. 18-22.

6. Khalil A.A., Tawfik A., Hegazy A.A. Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 167. P. 55-64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01165.

7. Токарев Ю.В., Гинчицкий Е.О., Гинчицкая Г.И., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И. Влияние комплекса добавок на свойства и структуру гипсового вяжущего // Строительные материалы. 2016. №1-2. С. 84-89.

8. Ярцев В.П., Репина Е.И., Хворов П.В., Фидоренко Я.И. Закономерности водопоглощения гипсобетона наполненного асбестоцементными отходами // Технологии бетонов. 2017. №7-8 (132-133). С. 29-30.

9. Dalmay P., Smith A., Chotard T., Sahay-Turner P., Gloaguen V., Krausz P. Properties of cellulosic fiber reinforced plaster: influence of hemp or flax fibers on the properties of set gypsum // Journal of materials science. 2010. Vol. 45. P. 793-803.

10. Нечаева Е.Ю., Тугушев Р.А., Уруев В.М. Модификация свойств строительного гипса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. №1-2. С. 107-113.

11. Бабков В.В., Латыпов В.М., Ломакина Л.Н., Шигапов Р.И. Модифицированные гипсовые вяжущие повышенной водостойкости и гипсокерамзито-бетонные стеновые блоки для малоэтажного строительства на их основе // Строительные материалы. 2012. №7. С. 4-8.

12. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. 2018. №8. С. 18-23.

13. Соколов П.Э., Вовко В.В., Лукьяница С.В., Ломов А.С., Черников В.Б. Использование комплексной модифицирующей добавки для расширения сырьевой базы мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов // Инженерный вестник Дона, 2022, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2022/7392/.

14. Черников В.Б., Рунг А.А., Ляшенко Д.А., Соколов П.Э. Определение влияния различного типа фибр на физико-механические свойства фиброгипса // Международная научно-практическая конференция



«Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса». Волгоград. ВолгГТУ, 2021. Ч. 1. С. 372-378.

15. Ляшенко Д.А., Соколов П.Э., Перфилов В.А. Вспученный фиброгипсовый материал // Инженерный вестник Дона, 2021, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924/.

References

1. Ferronskaya A.V. Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye): Spravochnik [Gypsum materials and products (production and application): Reference book]. M.: ASV, 2004. 488 p.

2. Kuz'mina R.I., Erzhanova N.S., Kunasheva Z.Kh. Vserossiyskaya konferentsiya «Khimiya biologicheskii aktivnykh veshchestv» (Proc. All-Russian Conference "Chemistry of biologically active substances"). Saratov. Saratovskiy istochnik, 2019. pp. 138-140.

3. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.B. Water-Resistant Gypsum Binding Agents and Concretes Based Thereof as Promising Materials for Building Green. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 177. №1. pp. 012-029. DOI: 10.1088/1755-1315/177/012029.

4. Morkovin A.A., Gorokhov T.I., Kovalev N.S., Erofeev A.V. Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Stroitel'stvo i rekonstruktsiya» (Proc. All-Russian Scientific and Practical Conference "Construction and Reconstruction"). Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022. pp. 255-258.

5. Ruzina N.S., Yakovlev G.I., Gordina A.F., Pervushin G.N., Semenova Yu.A., Begunova E.V. Stroitel'nye materialy. 2020. №7. pp. 18-22.

6. Khalil A.A., Tawfik A., Hegazy A.A. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 167. P. 55-64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01165.

7. Tokarev Yu.V., Ginchitskiy E.O., Ginchitskaya G.I., Gordina A.F., Yakovlev G.I. Stroitel'nye materialy. 2016. №1-2. pp. 84-89.

8. Yartsev V.P., Repina E.I., Khvorov P.V., Fidorenko Ya.I. Tekhnologii betonov. 2017. №7-8 (132-133). pp. 29-30.
9. Dalmay P., Smith A., Chotard T., Sahay-Turner P., Gloaguen V., Krausz P. Journal of materials science. 2010. Vol. 45. pp. 793-803.
10. Nechaeva E.Yu., Tugushev R.A., Uruev V.M. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2009. №1-2. pp. 107-113.
11. Babkov V.V., Latypov V.M., Lomakina L.N., Shigapov R.I. Stroitel'nye materialy. 2012. №7. pp. 4-8.
12. Petropavlovskaya V.B. Stroitel'nye materialy. 2018. №8. pp. 18-23.
13. Sokolov P.E., Vovko V.V., Luk'yanitsa S.V., Lomov A.S., Chernikov V.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2022/7392/.
14. Chernikov V.B., Rung A.A., Lyashenko D.A., Sokolov P.E. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa» (International scientific and practical conference "Actual problems and prospects of development of the construction complex"). Volgograd. VolgSTU, 2021. Part 1. pp. 372-378.
15. Lyashenko D.A., Sokolov P.E., Perfilov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924/.